

# Betriebsanalyse und energetische Bewertung einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes

**Prof. Elmar Bollin**

Fakultät Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik (M+V),  
Leiter der Forschungsgruppe net –  
Nachhaltige Energietechnik  
an der Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg  
Tel.: 0781 205-126  
E-Mail: bollin@fh-offenburg.de

**1954:** Geboren in Lörrach  
Studium Maschinenbau an der Technischen Hochschule Karlsruhe  
**1981:** Abschlussdiplom  
**1982–92:** Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut  
für Solare Energiesysteme Freiburg  
**Seit 1993:** Professur an der Hochschule Offenburg  
**Seit 2000:** Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF)  
der Hochschule Offenburg

**Lehrgebiete:** Solartechnik, Regelungstechnik, Gebäudeautomation  
**Forschungsgebiete:** Solarthermische Großanlagen, Photovoltaische  
Inselversorgung, Energiemanagement in Gebäuden



## 3.3 Betriebsanalyse und energetische Bewertung einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin  
Dipl.-Ing. (FH) Klaus Huber  
Dipl.-Ing. (FH) Eva Scheck  
Dipl.-Ing. (FH) Daniel Jödicke, MSc.

### Einleitung

Die Hochschule Offenburg begleitet seit Juli 2006 in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg und der HfT Stuttgart die Solar unterstützte Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen. Die Anlage wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens Solarthermie-2000plus vom Bundesumweltministerium gefördert. Dabei wurde die bereits bestehende Adsorptionskälteanlage, die bisher mit Kompressorenabwärme und Gaskesseln betrieben wurde, durch eine

Solaranlage als dritter Wärmelieferant ergänzt.

Das Solarsystem setzt sich aus einem Kollektorfeld mit 1330 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche CPC-Vakuumröhrenkollektoren der Firma Paradigma und zwei Pufferspeichern mit je 8,5 m<sup>3</sup> Speichervolumen zusammen. Die Kälteerzeugung wird mit drei Adsorptionskältemaschinen (AdKMs) mit je 353 kW Nennkälteleistung realisiert. Solarsystem und Kälteanlage sind über das Heizungssystem über diverse Verteiler miteinander verbunden. Zusätzlich wurde die Solaranlage an die Bauteiltemperierung eines neuen Gebäudes angeschlossen, um außerhalb der Betriebszeiten der Kältemaschinen die Solarwärme optimal bei niedrigen Rücklauftemperaturen nutzen zu können.

Mit Hilfe von 81 zusätzlichen Sensoren wird ein Detailmonitoring des Solar- und Kälteanlagenbetriebs ermöglicht.

Nach Beendigung des Probetriebs konnte im August 2008 das erste Intensivmessjahr gestartet werden [1,2].

### Monitoring und Anlagentechnik

Mit Hilfe des zusätzlichen Messsystems sollen alle Energieströme innerhalb der Systemgrenzen Solaranlage/Hauptverteiler und Adsorptionskälteanlage und über die Systemgrenzen hinweg erfasst werden. Insbesondere wird neben der Wärmemenge, die vom Kollektorfeld in die Speicher eingespeist und an das Heizungssystem abgegeben wird, auch die Wärme von Heizkesseln und Kompressoren erfasst. Wegen des „Nur-Wasser-Systems“ und der damit verbundenen Frostschutzschaltung wird auch die Wärme, die aus dem Heizungssystem über die Pufferspeicher zum Kollektorfeld gepumpt wird, separat erfasst. An den AdKMs werden die Wärmemengen an allen drei Kreisläufen jeder Maschine gemessen.



Abb. 3.3-1: Von links: Luftaufnahme des Firmengeländes der Festo AG & Co. KG in Esslingen, Kollektorfeld, Adsorptionskälteanlage, Quelle: Festo

Die differenzierte Erfassung des Stromverbrauchs der AdKMs, deren peripherer Pumpen sowie der Kühltürme soll Aufschluss über den elektrischen Energiebedarf der Maschinen liefern und eine Aufschlüsselung nach einzelnen Verbrauchern ermöglichen. Darüber hinaus werden die solare Einstrahlung sowie die Außen- und Kollektortemperatur erfasst. Abbildung 3.3-2 zeigt das vereinfachte Anlagenschema der Solaranlage.

### Betriebsergebnisse und -erfahrungen

#### Messergebnisse Solarsystem

Seit 01.08.2008 läuft die Intensivmessphase. Im Fünf-minutentakt werden die Messwerte von 81 Sensoren erfasst und täglich von der Hochschule Offenburg abgerufen. Bis auf wenige Störungen liegen aus dem ersten Intensivmessjahr vom 01.08.08 bis 31.07.09 vollständige Messdaten vor. Die Messdaten sind nachfolgend in der Tabelle zusammengefasst und teilweise in Abbildung 3.3-3 grafisch dargestellt.

Der aufgetretene Sensorausfall bei der Entladevolumenstrommessung (VSV) zwischen dem 15.09. und 06.10.2008 wurden in der Tabelle und Abbildung 3.3-3 bei der Auswertung derart berücksichtigt, dass für diesen Zeitraum der gleiche prozentuale Wärmeverlust im

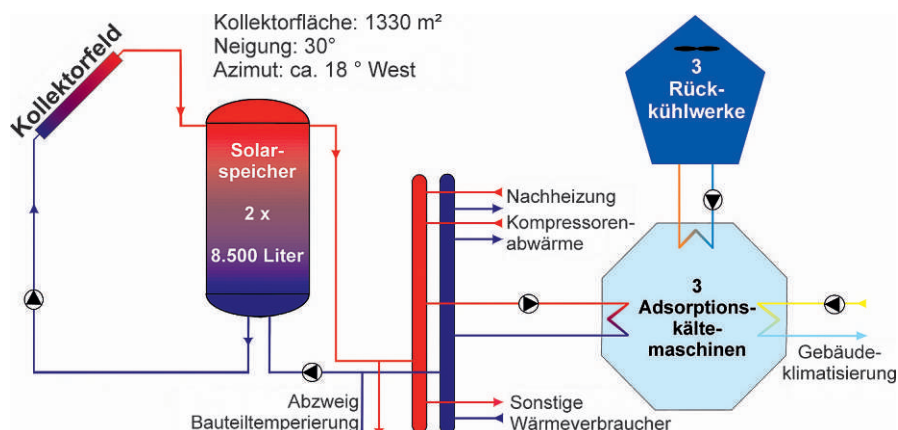


Abb. 3.3-2: Schema der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen

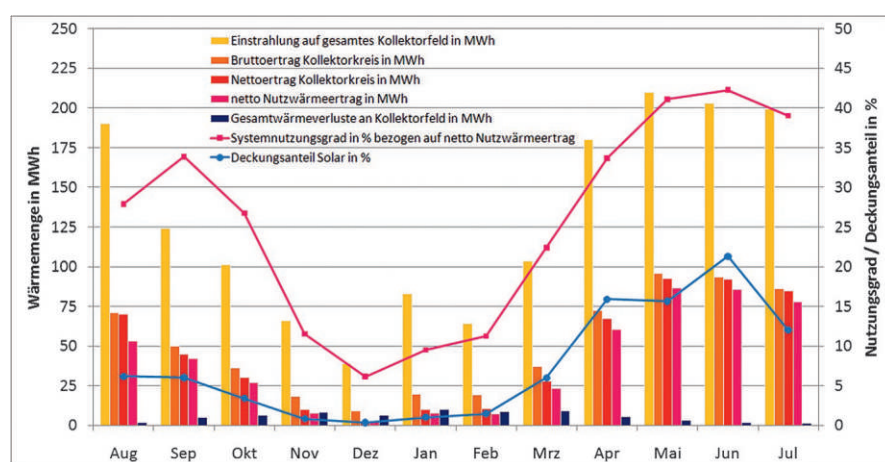


Abb. 3.3-3: Grafische Darstellung der wichtigsten Messdaten aus der Tabelle

	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	gesamt
<b>Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld in MWh</b>	190	124	101	66	39	83	64	104	180	210	203	199	1563
<b>Nettoertrag Kollektorkreis in MWh</b>	70	45	30	10	2,8	10	11	28	67	93	92	85	543
<b>netto Nutzwärmeertrag in MWh</b>	53*	42**	27**	7,6	2,4	7,9	7,2	23	61	86	86	78	481
<b>Systemnutzungsgrad in % bezogen auf netto Nutzwärmeertrag</b>	28*	34**	27**	12	6,2	9,5	11	22	34	41	42	39	31
<b>Gesamtärmeverluste an Kollektorfeld in MWh</b>	1,6	4,9	6,2	8,2	6,2	10	8,5	8,9	5,2	3,0	1,5	1,4	66
<b>Wärme aus Gaskesseln in MWh</b>	565	445	563	685	474	548	208	85	78	179	73	324	4227
<b>Deckungsanteil Solar in %</b>	6,2	6,0	3,4	0,8	0,3	1,0	1,5	6,0	16	16	21	12	6,3
<b>Deckungsanteil nachhaltige Wärme in %</b>	34	36	29	25	33	30	58	78	80	68	82	50	45
<b>Wärmeverbrauch AdKMs in MWh</b>	725	521	522	420	47	0,6	0,1	0,2	155	382	274	530	3577
<b>Kälte von AdKMs in MWh</b>	383	267	251	184	22	0	0	0	67	184	102	206	1665
<b>COP</b>	0,53	0,51	0,48	0,44	0,46	0	0	0	0,44	0,48	0,37	0,39	0,47

\* Wegen Ventilstörung vom 06. – 15.08. nur geringe Entladeleistung

\*\* Wegen Sensorausfall zwischen 15.09. und 06.10. angenommener Speicherverlust von 9 % (Mittelwert aus je einer Woche vor und nach dem Zeitraum)

**Tabelle:** Schema der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen

Speicher unterstellt wurde wie in den beiden Wochen vor und nach dem Fühlerausfall. Die Störung eines Ventils auf der Entladeseite (06. bis 15.08.), die zu einer deutlichen Verringerung des Entladevolumenstroms und damit auch des Ertrags führte, wurde nicht weiter berücksichtigt.

Im Intensivmessjahr konnten bei einer solaren Strahlungsmenge auf das Kollektorfeld von 1563 MWh (1283 kWh/m<sup>2</sup>), 543 MWh (445 kWh/m<sup>2</sup>) (Nutzungsgrad 35 %) an Wärme in die Solarspeicher eingespeist werden. Hiervon wurde bereits die Wärmemenge, die an Anfahrt und Frostschutzverlusten (insgesamt 66 MWh bzw. 54 kWh/m<sup>2</sup>) entstanden ist, abgezogen. Auf der Entladeseite konnten den Speichern 481 MWh (395 kWh/m<sup>2</sup>) Wärme entnommen werden (Nutzungsgrad 31 %). Auch hier wurden bereits Anfahrt- und Frostschutzverluste abgezogen. Der solare Deckungsanteil für den betrachteten Zeitraum von 6,3 % fällt sehr gering aus. In den Sommermonaten Juni und Juli konnten Deckungsanteile von bis zu 21 % erzielt werden. Ursache hierfür ist allerdings auch die veränderte Betriebsweise der AdKMs, wodurch die Gaskessel seltener zum Einsatz kommen. Im Juli 2009 wurde die Betriebsweise nochmals verändert, sodass der Deckungsanteil der nachhaltig erzeugten Wärme wieder deutlich geringer ausfiel (vgl. Abbildung 3.3-4).

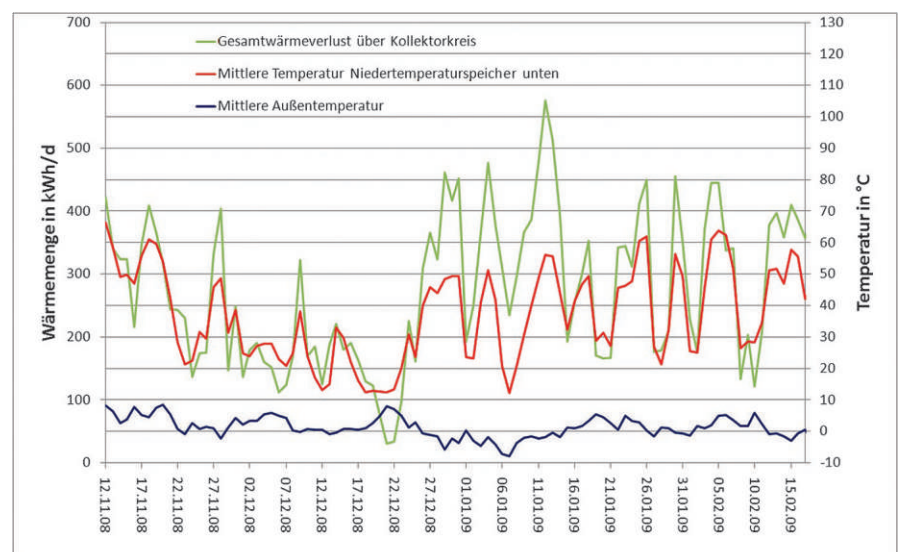
Der Deckungsanteil nachhaltig erzeugter Wärme, berechnet aus Nutzwärme der Solaranlage und Abwärme von Kompressoren bezogen auf den Gesamtwärmeverbrauch, beträgt 45 %. Dieser konnte ab Februar 2009 durch höhere Kompressorabwärmeleistungen deutlich gesteigert werden. Außerdem erhöht sich der Deckungsanteil auch hier durch die veränderte Betriebsweise der AdKMs (vgl. Abbildung 3.3-4). Für den Betrieb der AdKMs wurden 3577 MWh an Wärme aus dem Wärmenetz der Festo AG & Co. KG benötigt, um damit 1665 MWh an Kälte zu erzeugen. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher COP (Coefficient of Performance Quotient aus Nutzkälte und Antriebswärme) von 0,47. In den Monaten Juni und Juli 2009 fällt der thermische COP deutlich niedriger aus als in den anderen Monaten.

### Betriebsweise und Optimierungsmaßnahmen

Die Solaranlage ist mit den AdKMs über einen zentralen Verteiler, an den weitere Wärmeverbraucher angeschlossen sind, verbunden (siehe Abbildung 3.3-2). Bei Einspeisung in diesen Hauptverteiler liegen die Rücklauftemperaturen meist über 60 °C. Die Solltemperatur für die Speicherentladung liegt bei 80 °C. Deshalb wurde ein direkter Abzweig zur Bauteilaktivierung eines Neubaus eingebaut. Die Speicher werden bei Entladung zur Bauteilaktivierung ab 35 °C entladen. Hierdurch sind Rücklauftemperaturen von 25 °C und darunter erreichbar. Zur Verhinderung häufigen Umschaltens zwischen Bauteilaktivierung und Hauptverteiler wurde die vorhergesagte Sonnenscheindauer des nächsten Tages als Regelparameter eingefügt. Sobald die prognostizierte Sonnenscheindauer einen bestimmten Wert überschreitet, wird am nächsten Tag permanent auf den Hauptverteiler geschaltet. Durch diese Regelung wurde an vielen Tagen die Einspeisung in die Niedertemperaturbauteilaktivierung verhindert. Durch die hohe Vor- und Rücklauftemperatur bei Entladung zum Hauptverteiler erhöht sich die Temperatur in den Speichern deutlich und es ergeben sich negative Auswirkungen auf den solaren Ertrag und die Wärmeverluste durch die Frostschutzschaltung (Abbildung 3.3-4). Deshalb wurde die prognostizierte Sonnenscheindauer als Regelparameter gelöscht. Es wird jetzt bei Heizbetrieb allein anhand der Spei-

chertemperatur entschieden, ob zur Bauteilaktivierung entladen wird. Da die Änderung erst kurz vor Umstellung auf Kühlbetrieb erfolgte, kann hierzu noch keine Aussage gemacht werden. Die Frostschutzverluste können nicht separat von den Anfahrtverlusten erfasst werden (zusammen 66 MWh/a). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch die beschriebenen hohen Speichertemperaturen die Frostschutzverluste deutlich höher waren als bei niedrigerer Speichertemperatur und dass das Kollektorfeld mit aktivem Frostschutz nicht so stark auskühlt als ohne.

Anfang April 2009 wurde die Betriebsweise der AdKMs so geändert, dass diese nur noch in Betrieb gehen, wenn eine nachhaltige Mindestwärmeleistung von der Solaranlage und den Kompressoren über einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung steht. Die einzelnen Maschinen werden dann je nach zur Verfügung stehender Wärmeleistung zu- bzw. weggeschaltet. Hierdurch wird eine Zusatzheizung durch die Gaskessel weitgehend vermieden. Die zusätzlich benötigte Kälte wird mit elektromotorischen Kompressionskältemaschinen erzeugt. Wie in der Tabelle und Abbildung 3.3-3 zu sehen, wurde hierdurch der solare und nachhaltige Deckungsanteil am Gesamtwärmeverbrauch in den Sommermonaten deutlich gesteigert. Im Juli 2009 mussten die AdKMs wieder häufiger betrieben werden, als es mit den nachhaltigen Wärmequellen allein möglich gewesen wäre, um den gesam-



**Abb. 3.3-4:** Zusammenhang zwischen mittlerer Speichertemperatur des Tages und Wärmeverluste an das Kollektorfeld bei Frostschutzbetrieb



ten Kältebedarf der Gebäude abzudecken. Dementsprechend fällt der solare Deckungsanteil mit 12 % bei nur leicht geringerem solarem Ertrag als im Mai und Juni deutlich niedriger aus.

Im April kam es teilweise zu Stagnationen der Solaranlage wegen zu geringer Wärmeabnahme. Die daraus resultierende Abschaltung der Kollektorkreispumpe wegen Überschreitung der Maximaltemperatur in den Solarspeichern führte zu einer Verringerung des solaren Ertrags. Dieses Problem konnte durch eine schrittweise Verringerung der zuvor beschriebenen nachhaltigen Mindestleistung für den Betrieb einer AdKM von ca. 500 kW auf nun 350 kW behoben werden.

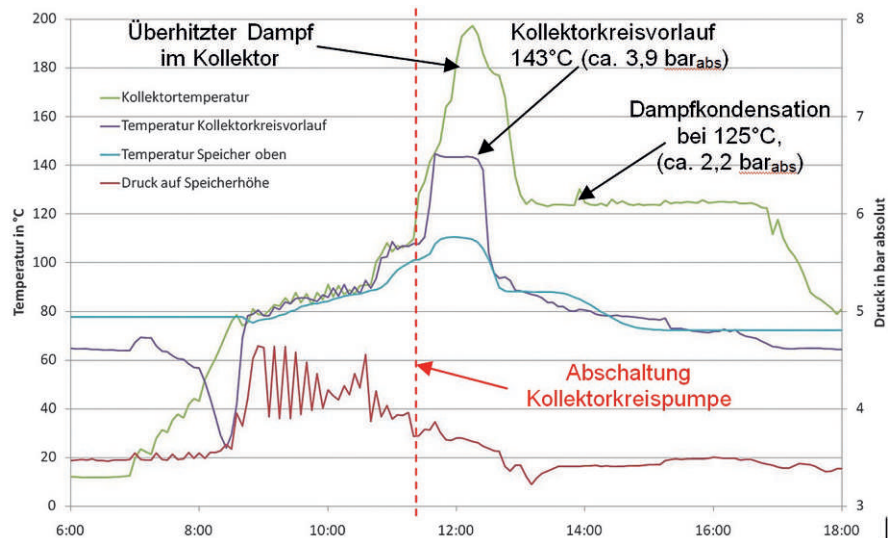
Bei auftretenden Stagnationen konnte das nachfolgend beschriebene Verhalten beobachtet werden (Abbildung 3.3-5). Die Kollektortemperatur steigt auf bis zu 200 °C (überhitzter Dampf) an. Die Temperatur im Kollektorkreisvorlauf steigt auf bis zu 143 °C, was einem Satttdampfdruck von ca. 3,9 bar entspricht.

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das flüssige Wasser komplett aus den Kollektoren über den Vorlauf in den ersten Speicher gedrückt und Dampf eingetragen wird, der dort kondensiert. Für diesen Fall wurde der Vorlauf in halber Höhe am Speicher angebracht, damit der Dampf beim Aufsteigen durch das Wasser im Speicher abkühlt und kondensiert.

Die Solaranlage ist in der Lage, im Fall einer Stagnation bei voller Einstrahlung den überhitzten Dampf aufzunehmen und nach der Kondensation des Dampfes wieder den regulären Betrieb selbstständig aufzunehmen.

### Zusammenfassung

Die bisherige Betriebserfahrung zeigt, dass die Kollektoranlage einen sinnvollen Beitrag zur Einsparung an Primärenergie und zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen leistet. Die von dem Kollektorhersteller abgegebene Ertragsgarantie von 500 MWh in den Solarspeicher einzuspeisende Wärme bei einem Nutzungsgrad von 33,4 % wurde mit 543 MWh bei einem Nutzungsgrad von 34,7 % eingehalten. Durch bereits durchgeführte Optimierungen an der Regelung der Speicherentladung und



**Abb. 3.3-5:** Stillstandsverhalten der Solaranlage der solaren Klimatisierung der Festo AG in Esslingen am 17.08.2008

der Betriebsweise der AdKMs sind zukünftig geringere Wärmeverluste im Bereich der Frostschuttschaltung sowie seltenere Stagnationsphasen und damit höhere Nettoerträge zu erwarten. Bei einer Überprüfung der bisherigen Regelstrategie sind zusätzliche Einsparungen durch eine Verringerung der Antriebswärme aus fossilen Wärmequellen möglich. Die AdKMs lassen sich mit guten Ergebnissen mit einer solarthermischen Antriebsquelle koppeln. Die Maschinen selbst arbeiten auch nach 7 bis 8 Jahren nahe an den vom Hersteller angegebenen Werten.

### Literatur

- [1] Huber K., Bollin E.: Detailmonitoring einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes, 18. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 23. – 25.04.2008
- [2] Bollin E., Huber K., Scheck E., Jödicke D.: Erste Ergebnisse und Betriebserfahrungen des Detailmonitorings einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 06. – 08.05.2009